

A See-through Display using the Maxwellian View with Holographic Optical Elements

Takahisa Ando, Toshiaki Matsumoto, and Eiji Shimizu

Abstract

We are developing a see-through display that uses holographic optical element. (HOEs) for the purpose of realizing a see-through head mounted display (HMD). Our display uses the Maxwellian view, which eliminates the need for focusing with a crystalline lens (ocular accommodation) because its depth field is extremely deep. We previously estimated the optical efficiency of a HOE that has both Maxwellian optics and a see-through function by using still images. In this report, we describe a prototype of a see-through display that provides electrical dynamic images by using a digital micro mirror device (DMD) as an electrical spatial light modulator.

4.1 Structure of the See-through Display

Fig. 8 illustrates the basic structure of a see-through display incorporating a SLM capable of displaying an electronic image in an optical system, and which can realize a Maxwellian view. In the see-through display, the light-transmitting object of Fig. 1 is replaced by an SLM such as a LCD, DMD (Digital Micro-mirror Device) or the like capable of displaying an electronic image. A laser is used as the illumination source of the SLM. The light from the laser source is rendered parallel by a collimator lens, in the form

of a backlight in a case where the SLM is a transmission-type LCD, or illumination light in a case where the SLM is a reflection-type LCD or DMD. The parallel beams having undergone spatial light modulation by the SLM are condensed by an optical lens or a HOE; herein, viewing takes place when the pupil becomes positioned on the focusing point of the beams. The light beams are controlled by a spatial filter so that one beam from an opening, i.e. from one pixel of the SLM (without scattering but with a spread corresponding to the resolution of one pixel) travels unidirectionally, whereby the beams of all the pixels in the SLM pass through the center of the pupil to be projected directly on the retina. The light beam of one pixel of the SLM stimulates then one point on the retina, so that the beams of all the pixels stimulate respectively different points of the retina. Since such retinal stimuli of the pixels through the center (node) of the crystalline lens, the optical stimulus of the aggregate pixels i.e. the pattern of the image displayed on the SLM can be perceived irrespective of focal adjustment by the crystalline lens.

ホログラフィック光学素子によるマックスウェル視を用いたシースルーディスプレイ

A See-through Display using the Maxwellian View with Holographic Optical Elements

安東 孝久^{†*}, 松本 敏昭^{††}, 正会員 志水 英二^{††}

Takahisa Ando ^{†*}, Toshiaki Matsumoto ^{††} and Eiji Shimizu ^{††}

Abstract We are developing a see-through display that uses holographic optical elements (HOEs) for the purpose of realizing a see-through head mounted display (HMD). Our display uses the Maxwellian view, which eliminates the need for focusing with a crystalline lens (ocular accommodation) because its depth field is extremely deep. We previously estimated the optical efficiency of a HOE that has both Maxwellian optics and a see-through function by using still images. In this report, we describe a prototype of a see-through display that provides electrical dynamic images by using a digital micro mirror device (DMD) as an electrical spatial light modulator.

キーワード: ホログラフィック光学素子, マックスウェル視, 焦点調節, 空間光変調素子

1. ま え が き

近年, 映像の世界は, 静止画像から動画像, 白黒画像からカラー画像へと変革を遂げ, 次世代映像として高精細映像, 立体映像などが期待されている。立体映像では, これまで各種の立体表示方式¹⁾が提案され, 実用化, 商品化された3次元ディスプレイも登場してきた。現在商品化されている立体ディスプレイは, 左右の眼に視差画像を呈示する2眼式立体表示方式が主流であるが, この方式では, 焦点調節と輻輳の不一致²⁾という生理的問題があり, 現在, 自然な立体視を実現する手法が各種提案されている³⁾。

一方, VR (Virtual Reality) の世界では, 現実世界に仮想映像を重ね表示して人間の情報処理能力を増強させようとするAR (Augmented reality)⁴⁾においてシースルーHMD (Head Mounted Display) が多用されてい

る。しかし, シースルーHMDで現実世界と仮想映像を同時に観察しようとする, 現実世界を観察する時の焦点調節はダイナミックに変化するにも関わらず仮想世界を見る時の焦点調節は固定されているので, 2眼式立体表示と同様に焦点調節と輻輳が一致しないことになる。

筆者らは, 焦点調節と輻輳の不一致が発生しないシースルーHMDの実現を目指して, ホログラフィック光学素子 (HOE: Holographic Optical Element)⁵⁾を用いたシースルーディスプレイを提案する。本ディスプレイでは, 観察者の眼球内に光を入れる方法としてマックスウェル視⁶⁾を使っているので焦点深度が非常に深い映像が呈示できる。したがって, 焦点調節と輻輳の不一致という従来の2眼式立体表示方式が持つ基本的問題を克服できる可能性がある。また, ARにおいて, 近点から無限遠まで外界をダイナミックに観察する場合でも, 仮想映像が常に鮮明に見えるという利点が期待できる。そこで, 筆者らは, マックスウェル視を特徴とする光学特性を有するだけでなく, 外界と仮想映像が同時に観察できるシースルー機能も有するHOEを考案した⁷⁾。さらに, このHOEを使って電子的な動画像が表示できる空間光変調素子 (SLM: Spatial Light Modulator) を使ったシースルーディスプレイを試作した。

本論文では, HOEとSLMを使ってマックスウェル視を与えるシースルーディスプレイの実現を目的として実施した試作システムについて報告する。まず, 2章でマックスウェル視の原理と特性を概観し, 3章では考案

日本バーチャルリアリティ学会第4回大会 (1999年10月) および SPIE Practical Holography XIV (2000年1月) で発表

2000年3月15日受付, 2000年6月30日再受付, 2000年8月7日採録
†財団法人 イメージ情報科学研究所

(〒559-0034 大阪市住之江区南港北1-14-16 WTCビル18F, TEL 06-6616-5008)

††大阪市立大学 工学部

(〒558-8585 大阪府住吉区杉本3-3-138, TEL 06-6605-2678)

*現在, 三洋電機株式会社 研究開発本部 ハイパーメディア研究所

†Laboratories of Image Information Science and Technology
(WTC Bldg. 18F, 1-14-16, Nanko-kita, Suminoe-ku, Osaka 585-0083, Japan)

††Faculty of Engineering, Osaka City University

(3-3-138, Sugimoto, Sumiyoshi-Ku, Osaka 558-8585, Japan)

*SANYO Electric Co., Ltd R&D Headquarters Hypermedia Research Center

したHOEの光学特性、4章でHOEとSLMで構成したシースルーディスプレイの実現方法、5章で試作結果について述べる。

2. マックスウェル視の原理と特性

本章では、マックスウェル視の原理、ならびにマックスウェル視を与える光学系をHMDとして実装することを前提とした場合の特性について考察する。

2.1 マックスウェル視の原理

マックスウェル視とは、平行光線束をレンズで集光させ、その集光点に瞳孔をおいて眼球内に光を入れることであり⁹⁾、視覚系の感度測定⁹⁾や視覚心理知覚実験⁹⁾において観察者に光刺激を与える方法として使用されている。図1にマックスウェル視の概念図を示す。点光源Sから発せられる光はコリメータレンズL1で平行光となり、透過物体Mに入射する。MをレンズL2の前焦点面に置き、観察者の瞳孔をレンズL2の後焦点面に置くと、物体Mと観察者の網膜は共役の関係となり、観察者は焦点深度が深い物体Mの光刺激を感じることができる。本光学系は、小さな開口絞り（ピンホール）の実像を瞳孔位置に作ると考えることができ、観察者の水晶体の焦点調節によらず網膜上に結像可能なディスプレイが実現できる¹⁰⁾。また、マックスウェル視で与えられる画角 θ は、平行光線束の径を T 、レンズL2の焦点距離を f とすると

$$\theta = 2 \tan^{-1}(T / 2f) \quad (1)$$

で与えられる。したがって、焦点距離 f を短くすると大きな画角が得られるので、小形光学系で広視野のHMDを実現するには都合が良いが、瞳孔をレンズの焦点位置に置かなければならず、光学系の調整が難しいことを考慮しなければならない。

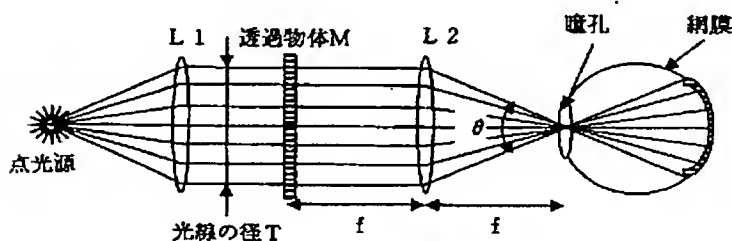


図1 マックスウェル視の概念図
Principle of Maxwellian View.

2.2 マックスウェル視の観察範囲

マックスウェル視で映像を観察する場合、観察者は図1のレンズL2の後焦点位置、すなわち平行光線束の収束点に瞳孔中心を置き、しかも光軸を視線方向に一致させなければならない。したがって、マックスウェル視をHMDの接眼光学系として実現する場合には、瞳を置く位置が観察者毎に調整（キャリブレーション）できなければならない。また、キャリブレーションを行っても、頭

部運動によるアイレリーフの変動や瞳位置のずれなどを考慮しておかなければならない。そこで、マックスウェル視による映像が観察できる範囲について考察する。

図1は、模式的に平行光線束の収束点が瞳孔中心になる場合を示しているが、瞳孔中心と収束点のずれはある程度許容される。瞳孔中心と収束点のずれの許容範囲は、光軸に垂直な方向では、観察者の瞳孔径の範囲である。図2(a)に示すように、平行光線束は収束点が水晶体中心をはずれても屈折されるだけなので、収束点は瞳孔径の範囲内に置けばよく、瞳孔径を D とすれば、光学系の光軸に対する瞳中心軸の変位 dy が $D/2$ の範囲内においてマックスウェル視の映像が観察できることになる。

一方、光軸方向に対してマックスウェル視が観察できる範囲は、図2(b)に示すように、平行光線の収束点前後において光線束が瞳孔径全体に入る範囲となる。この変位 dx は

$$dx = D / 2 \cdot \cot(\theta / 2) \quad (2)$$

で表される。

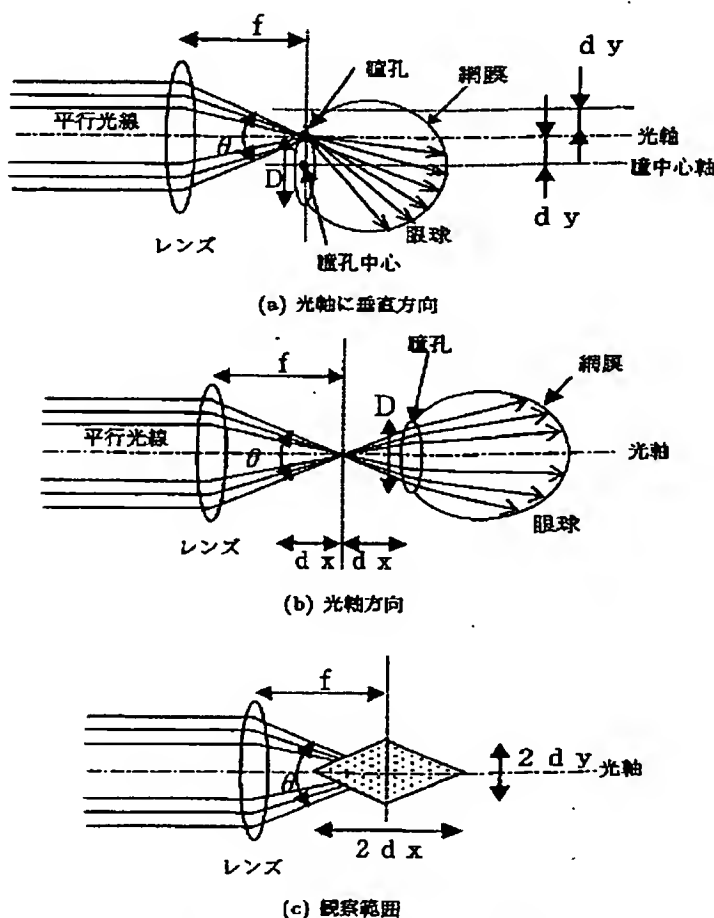


図2 マックスウェル視の観察範囲
Viewing area of Maxwellian View.

したがって、全光線束が眼球内に入る範囲は図2(c)に示すひし形領域となる。この領域外では、光線が全く観察できないか、瞳孔径によってけられた光線しか観察できないようになる。ここで、 $D=2\sim 8\text{ mm}$ とすると、

$dy=1\sim 4\text{mm}$, 画角 30° の映像を呈示することを考えると, $\theta=30^\circ$ より, $dx=4\sim 15\text{mm}$ となる。

以上の考察より, 本光学系をHMDの接眼光学系として実装する場合には, 瞳孔を置く位置が制限されるので光軸を瞳孔中心に合わせる調整機構が必要となるが, この調整精度は 1mm を確保しておけばよいと考えられる。また, 頭部運動によってアイレリーフの変動や瞳孔中心と光軸のずれが発生するが, 接眼光学系をヘッドセットで固定することで瞳孔中心は図 2(c) に示す領域内に収めることができると考えられる。

2.3 眼球回転時の観察範囲

マックスウェル視は, 前述のように観察範囲が非常に狭い。ここでは, 狭い観察範囲の光学系をHMDとして実装した場合に眼球運動, すなわち単眼での”ひき運動(内転)”と両眼での”よせ運動(輻輳)”に対してどの程度観察範囲が保てるかについて考察する。図 3(a) のように, 無限遠を見る視線方向 OC (O は眼球の回旋中心点, R は回旋中心点から瞳孔中心までの距離) とマックスウェル視の光軸が一致するようにキャリブレーションされ, この状態から視線 OP が内転すると仮定する。マックスウェル視の光が観察できる最大の眼球内転角度 ϕ を, 図 3(b) のように光軸が瞳孔端部を通る状態に取ると

$$\phi = \tan^{-1}(D/2R) \quad (3)$$

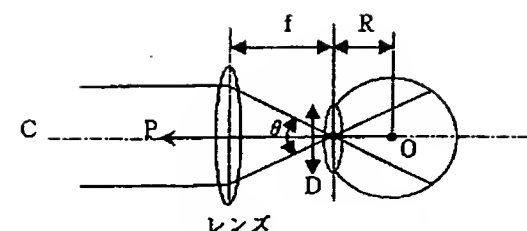
となる(この時, マックスウェル視の光は, 瞳孔によってけられて半分しか入らない。けられがたい角度は ϕ よりわずかに小さい角度である。ここでは, 説明の便宜上 ϕ を光軸が瞳孔端部を通る場合と規定した)

一方, 画角 θ で呈示される映像に対して視線移動できる内転の限界角度 δ は, 図 3(c) に示すように視線 OP が映像の端部にかかる時の角度となり

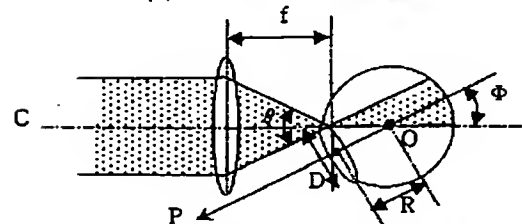
$$\delta = \tan^{-1}(f \tan(\theta/2) / (R + f)) \quad (4)$$

となる。 R を標準的な眼球の直径 24mm の $1/2$ と仮定すると, 瞳孔径 D が最小の 2mm で $\phi = 5^\circ$, 最大の 8mm で $\phi = 18^\circ$ となる。一方, $f = 30\text{mm}$ で画角 $\theta = 30^\circ$ の映像を呈示する場合 $\delta = 11^\circ$ となる。現在製品化されているHMDの画角は 30° 程度であり, これと同程度のマックスウェル視の映像を与えたとしても, 瞳孔が最大径の場合には映像全体の範囲内 ($2\phi = 36^\circ > 2\delta = 22^\circ$) で視線移動が可能だが, 最小径の場合は呈示される映像の約 $1/2$ の範囲内 ($2\phi = 10^\circ < 2\delta = 22^\circ$) でしか視線移動ができないことになる。よって, マックスウェル視の映像に対して視線が動かせる範囲は瞳孔径に左右される角度 ϕ で表すものとして, 以下, 両眼の場合について検討する。

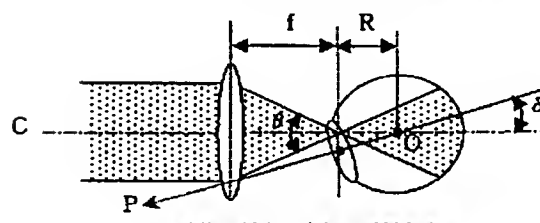
両眼にマックスウェル視を与えた時の輻輳近点を角度 ϕ で表すと, 近点距離 ds は, 眼間距離を Pd とすると, 図 4 より



(a) キャリブレーション状態



(b) マックスウェル視に対する内転の限界角度



(c) 映像に対する内転の限界角度

図 3 眼球内転時の観察範囲
Viewing area for adduction.

$$ds = Pd/2 / \tan \phi = Pd \cdot R / D \quad (5)$$

となる。よって, 瞳孔径 $D = 2\text{mm}$ (最小) の時は, 立体視における輻輳は近点 $ds = 390\text{mm}$ から無限遠まで, 瞳孔径 $D = 8\text{mm}$ (最大) の時は, 近点 $ds = 98\text{mm}$ から無限遠まで変化可能となる (Pd は 65mm と仮定)。調節と輻輳が一致しないといわれる従来の2眼式立体ディスプレイにおいては, 自然な立体視を与える条件は, 調節位置が 50cm の時には $18\text{cm} \sim 2\text{m}$ の範囲に輻輳させるべきと提唱されている²⁾。この条件に従うと, 例えば 1.2m 先に 33 インチの画面 (画角約 30°) を2眼立体視させるディスプレイ¹⁾の場合には, 輻輳は 500mm 以上遠にすべきとされる。これに対し, 焦点深度が深い映像が呈示できるマックスウェル視では, 最小瞳孔径の場合でも 390mm 以上で輻輳変化が可能となり, 従来の立体ディスプレイと同程度かそれ以上の輻輳変化が可能と考えられる。

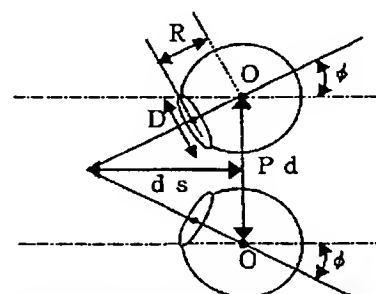


図 4 両眼マックスウェル視の輻輳近点
Near point of convergence.

3. HOEの光学特性

マックスウェル視によって深い焦点深度の映像が呈示できるシースルーHMDを実現するには、平行光線束を収束させるレンズと外界光に仮想映像を重畳表示させるコンバイナが必要になる。従来のHMDでは、固定焦点の光学レンズと、ハーフミラーのコンバイナが接眼光学系として備えられている。しかし、SLMとして使用される小形LCD (Liquid Crystal Display) などの映像を虚像拡大する光学レンズは拡大率と視野角を大きく取るには実用的な限界がある。また、ハーフミラーは、外界光の透過と仮想映像の反射がトレードオフの関係にあることから、外界と仮想映像のどちらも明るく観察することができない。そこで、筆者らは、1つのホログラムにレンズ機能、干渉フィルタなどの多機能性をもたせたHOE⁹⁾をHMD用の接眼光学系に使用することを提案した⁷⁾。本章では、シースルーで外界を見通せると同時にマックスウェル視による映像が観察できるHOEの光学特性について述べる。

3.1 HOEの仕様

HOEは、ホログラム乾板に2つのレーザ光を照射して生成される干渉縞を記録した回折格子である。図5に2光束干渉法で作成したHOEの光学仕様を示す。HOEは、外界の全波長域の光を透過させると同時にSLMが発する特定波長の光を回折させる波長選択性を持つことから、外界光と仮想映像を同時に明るく観察することができる。また、HOEは、特定方向から入射した光しか回折しない角度選択性を持っているため、図5に示すように、右方向からHOEに入射した平行光は右目に収束するように回折し、左方向からHOEに入射した光は左目に収束するように回折させることができる。観察者は左右の瞳孔をそれぞれの収束点に置くと、マックスウェル視として呈示される光を感じることができる。HOEに入射させる平行光に空間的な光強度変調をかけると、変調に応じて発生する視標(映像のパターン)が知覚できる。

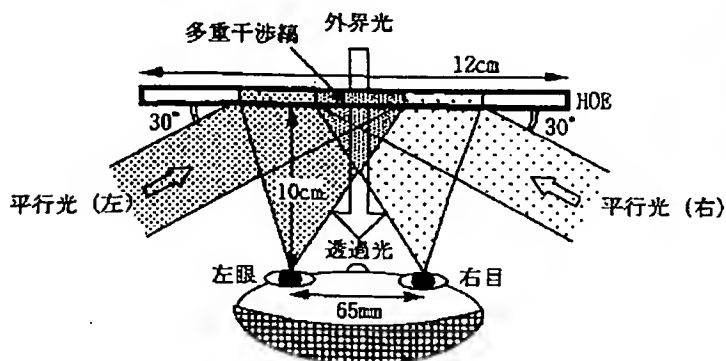


図5 HOEの光学仕様
Optical specification of HOE.

HOE上には右方向から入射する光を回折させる干渉縞と左方向から入射する光を回折させる干渉縞を多重に記録できる。図5のように、HOE上に多重の干渉縞部分を設けると、左右眼それぞれの視野が広く取れるので、広視野の立体視が可能である。

3.2 HOEの光学特性実証

筆者らは、前述の通り1枚のHOEに広視野のマックスウェル視が左右眼に分離呈示できると同時に外界をシースルーで観察できるHMD用コンバイナを考案した。本節では、本HOEの光学特性、すなわち両眼分離特性とシースルー特性を実証した実験について述べる。

図6に実験光学系を示す。本光学系ではSLMとしてスライドマウントに実装された透過形フィルムを用いた。半導体レーザ(光出力3 mW, 波長635nm)の出力光をコリメートし、透過形フィルムに照射する。透過形フィルムによって空間光変調された平行光をHOEに入射させた。

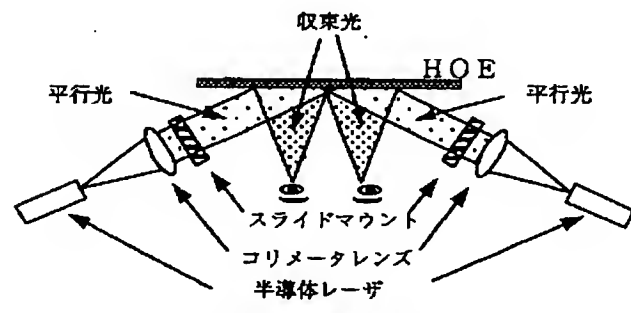


図6 実験光学系
Optical system for reconstruction.

図7に、図6の実験光学系で観察できた画像を、(a)左眼用画像、(b)右眼用画像として示す。屋内照明光(約900lx)の下で外界に重畳された画像が観察できる。三角形と円の左右眼用の視差が識別でき、HOEのシースルー性能と両眼分離性能が実証できた。



(a) 左眼用画像 (b) 右眼用画像

図7 HOEを用いたシースルー画像
Images through HOE.

なお、本実験用光学系を矯正用眼鏡を装着していない近視者に観察させた。その結果、近視者は外界がぼけた状態で観察したにも関わらずマックスウェル視の視標は明瞭に判別できたことも確認した¹²⁾。

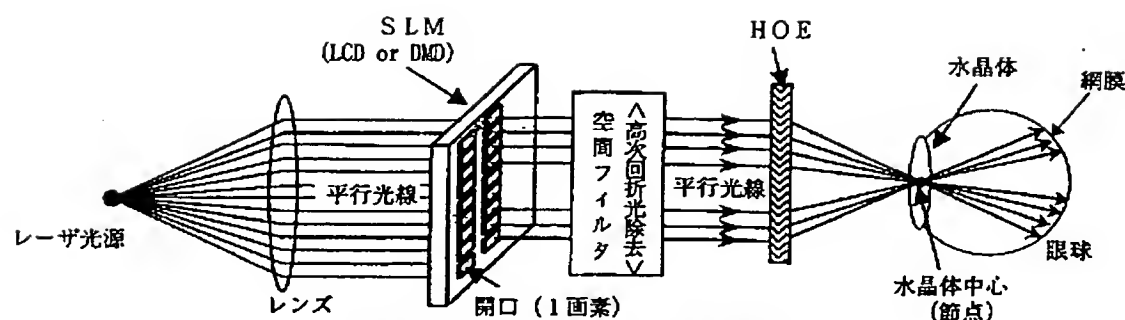


図8 シースルーディスプレイの基本構成
Structure of see-through display.

4. HOEとSLMによる映像呈示方法

前節では、透過形フィルムをSLMとして用いた光学系によってHOEの両眼分離機能とシースルー性能を検証したが、3次元ディスプレイを実現するには、SLMは電子的な動画像が表示できるものでなければならない。本章では、HOEと電子的なSLMを用いてコンピュータの出力映像をマックスウェル視させるシースルーディスプレイの実現方法について述べる。

4.1 シースルーディスプレイの構成

マックスウェル視が実現できる光学系に電子的な映像が表示できるSLMを組み込んだシースルーディスプレイの基本構成を図8に示す。図1に示す透過物体MをLCDやDMD (Digital Micro mirror Device) などの電子的な映像が表示できるSLMに置き換えたものである。SLMの照明光源はレーザを用いる。レーザ光源からの光は、コリメータレンズで平行光となり、SLMが透過形LCDの場合はバックライト、反射形LCDやDMDの場合は照明光となる。SLMによって空間光変調された平行光は光学レンズ、またはHOEで集光され、その集光点に瞳孔を置いて観察する。SLMの開口部、すなわち1画素から1本の光線(1画素の解像度分の広がりを持つが拡散しない)が1方向に飛び出すように空間フィルタで光を制御すると、SLM上の全画素分の光は、瞳中心を通過して網膜上に直接投影される。この時、SLMの1画素の光は網膜上のある1点を刺激することになり、全画素分の光がそれぞれ網膜上の異なる点を刺激することになる。この各画素の網膜上の刺激は、光が水晶体中心(節点)を通過しているため、全画素の光刺激、すなわちSLMに表示された映像のパターンは水晶体の焦点調節に関係無く知覚することができる。

4.2 試作システム

本方式のHMDの諸特性を検討するために試作を行った。SLMには微小ミラーで光を反射させるDMDがLCDよりも光の利用効率に優れていると考えられたのでDMDを使用した。DMDは、1画素16 μ m四角の微小ミラーが光を反射することによって光変調を行うデバイスである¹³⁾。DMDは、市販のDLPプロジェクタ

(PLUS社UP-800)を分解し、光学エンジン部分に搭載されたDMDチップにレーザ光線が照射できるように改造した。図9に、プロジェクタから分離した光学エンジン部の外観を示す。0.67インチのDMDチップにレーザ光線が照射できるようにプロジェクションレンズ等の光学系をすべて取り除いた。DMD駆動基板、ならびにチップを固定するフレームなどを細かく分解すると動作の安定性を欠く恐れがあったので、実験が可能な範囲で最小限の分解、改造とした。



図9 DMDの光学エンジン部
Optical engine parts of DMD.

図10に、HOEとDMDを組合せて試作したシースルーディスプレイの実験光学系ブロック図を示す。本光学系で使用したDMDは市販のプロジェクタを分解したので、DMDチップそのものを使うことができず駆動回路まで含めた光学エンジン部を使用した。そのため、小形化に限界があり、頭部搭載形の光学系ではなく卓上形の光学系とした。DMDはSVGA解像度でコンピュータ画面の画像を表示する。光源は図6の光学系と同じ半導体レーザを使用した。半導体レーザの出力ビームをコリメータレンズ($f=75\text{mm}$, $D=30\text{mm}$)で平行光にした後、ミラーでDMDチップ表面に照射する。照射された平行光線束がDMDの微小ミラー集合体によって空間変調されて反射される。その反射光を、次節に述べる高次回折光除去光学系で空間フィルタリングし、HOEに入射させるとDMDに表示された映像がマックスウェル視できる。

本ディスプレイでは、DMDの照明用光源にレーザ光線を使用しているため、映像を観察する場合、コヒーレン

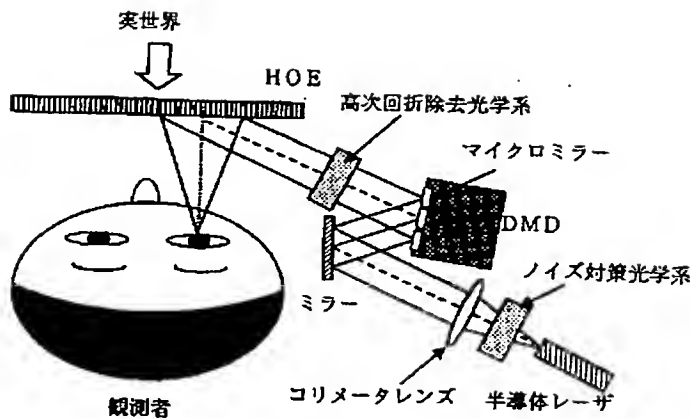


図 10 DMD搭載形シースルーディスプレイ
See-through display using DMD.

トノイズが観察される。これを除去するために、拡散板によってレーザ光線のビームを時間的にわずかに振らせるようにした⁹⁾。半導体レーザのビームをコリメーティングするための拡大レンズ出射口近くに拡散板を置き、これを回転させてDMDに照射する平行光の光束を僅かに振らせてスムージングを行う、ノイズ対策光学系を装備することでコヒーレントノイズを低減した。

4.3 空間フィルタリング

本ディスプレイでは、照明光源にレーザ光線を使っているため、DMDのミラーの回折現象が発生する。そのため、0次回折光だけを透過空間フィルタリングを行う高次回折光除去用光学系を備えた。

(1) 高次回折光除去方法

DMDにレーザ光を照射して得られた平行光には、高次回折光が含まれている。この平行光をそのままHOEに入射させると映像が多重像になるため、DMDから高次回折光が含まれない反射光を得る必要がある。高次回折光を除去するために再回折光学系¹⁴⁾によるフィルタリングを行い、0次光だけを取り出すようにした。図11に空間フィルタリングを行う再回折光学系の概念図を示す。

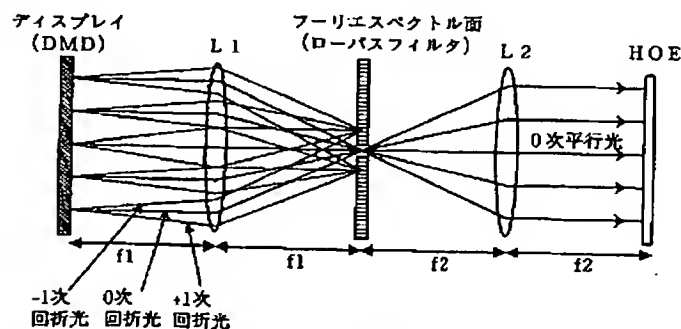


図 11 再回折光学系
Double diffraction optical system.

DMDからの反射光はいったんレンズによってフーリエ変換される。レンズL1の前焦点面f1にDMDを置くと後焦点面にフーリエスペクトル面が形成される。このフーリエスペクトル面には0次の回折光と高次回折光

の多数の点像が形成され、この位置に0次光、すなわちフーリエスペクトルのDC成分だけを通過させるローパスフィルタを配置する。そしてレンズL2の前焦点f2をL1の後焦点f1の位置に合わせるとL2から出る光は、0次光だけの平行光線束となる。L2から出る平行光をHOEに入射させると、HOEの収束点に瞳孔中心を合わせれば、DMDに表示された映像をマックスウェル視によって観察することができる。

(2) 再回折光学系の作用

再回折光学系のフーリエスペクトル面に配置するローパスフィルタはDC成分を通過させるピンホールである。ピンホールで高次回折光を除去する方法について説明する。

DMDは微小ミラーで構成されているので反射格子と扱うことができる。反射格子の回折は開口による回折と同じとみなせる¹⁵⁾ので以下では一般論として開口による回折として論じる。また、DMDは16μm四角のミラーが規則正しく2次元配列されたものであるが、2次元配列の多数開口の回折は1次元の積で表されるので、1次元の多数開口の回折として論じる。したがって、ここでは、単純に周期的な多数の単スリットの回折を例にして0次回折光を取り出すピンホールの作用について説明する。

図11のフーリエスペクトル面には、レンズL1によってSLMの多数開口によるフランクフルト回折像が形成される。このフランクフルト回折像の強度分布を、1次元の周期的な単スリットの回折として考える。幅aのスリットが間隔bでx軸に沿って周期的に並び、スリットの全長がcである場合のフランクフルト回折像の強度分布I(f)は、振幅分布G(f)の二乗となり、G(f)は次式で表される¹⁶⁾。

$$I(f) = |G(f)|^2$$

$$G(f) = abcsinc(af)[\text{III}(bf) * \text{sinc}(cf)] \quad (6)$$

ただし、

$$(f=x/\lambda/r)$$

λ：入射光の波長

r：スリットと回折像の観測面までの距離

(フーリエ変換用レンズの焦点距離)

x：回折像が現れる観測面(フーリエスペクトル面)でのx軸方向の変位

III(bf)：周期1/bのシャープ関数

I(f)は、G(f)が、 $f=1/b \cdot m$ ($m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$)において極大となり、 $m=0$ で0次光のメインローブ、 $m=\pm 1$ で±1次回折光の第1サイドローブ、以下、高次回折光のサイドローブが現れる。各サイドローブはシャープ関数の周期 $f=1/b$ で現れ、メインローブおよび各サイドローブの幅は $f=2/c$ で与えられる。すなわち、

図 11 の再回折光学系のフーリエスペクトル面上には中央に幅 $x_0 = 2 \cdot \lambda \cdot r / c$ のメインローブが現れ、その両サイドに距離 $x_1 = \lambda \cdot r / b$ だけ離れて第 1 サイドローブが現れることになる。したがって、フーリエスペクトル面上に、半径 W ($x_0 < W < x_1/2$) のピンホールまたは幅 W の矩形開口など、メインローブだけを通過させるローパスフィルタを配置すれば、0 次だけの光を通過させることができる。

DMD は、0.67 インチ SVGA 解像度なので、 $a=16 \mu\text{m}$ 、 $b=17 \mu\text{m}$ 、 $c=13.6\text{mm}$ となり、半導体レーザーの波長 $\lambda = 635\text{nm}$ 、フーリエ変換用レンズの焦点距離 $r = 120\text{mm}$ を使用したので、メインローブと第 1 サイドローブ間隔は、(6) 式より計算値で $x = 4.5\text{mm}$ となり、実測値でも同様であった。メインローブの幅は、計算値では $11 \mu\text{m}$ となるが、実際にはレンズの収差、照明光の平行度の誤差等で実測値としては 1mm 程度の輝点となっていたので、ピンホール直径は 2mm を使用した。図 12 に HOE、SLM、再回折光学系で構成されたシースルーディスプレイの外観を示す。



図 12 ディスプレイの外観
Appearance of display.

5. 試作結果

図 10 に示す光学系を実現した結果、観察者は、外界をシースルーで観察すると同時にコンピュータ出力の動画が観察できた。本ディスプレイは水晶体の焦点調節を必要としないため、近視眼、遠視眼の観察者でも矯正用眼鏡なしで仮想映像が明瞭に認知できた。図 13 に、外界に重畳表示した仮想映像を CCD カメラで撮影した様子を示す。表示されている仮想映像はコンピュータからの出力映像である。図形の周りに写っているのは撮影時に混入したゴーストであり、肉眼観察時には観測されない。図 13(a) では、外界に対してカメラの焦点が合っている状態 (Focus 状態) において、外界と仮想映像どちらも鮮明に図形が判別できる。一方、図 13(b) では、カメラの焦点がずれている (Defocus 状態) ので、外界はぼけて見えるが、仮想映像は鮮明に見える。本結果から、DMD に表示された映像をマックスウェル視として呈示できるシースルーディスプレイでは、焦点深度が非常に深い映

像が呈示でき、観察者の焦点調節が変動しても常に仮想映像は明瞭に観察できることが示された。

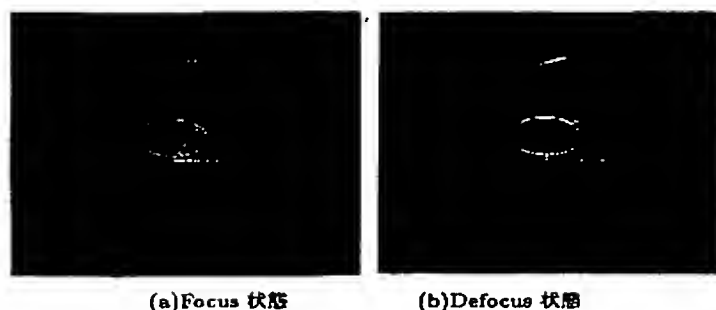


図 13 シースルーディスプレイの映像
Images on See-Through Display.

HOE の光学性能は、外界光 (全波長) の透過率が 68 %、レーザー光の回折効率 (1 次回折光強度 / 入射光強度) が 38 % であった。短波長 (635nm) の回折光と外界光が HOE を通して重畳表示されるので、観察する仮想映像の色純度が変化する。解像度では、解像度チャート (SVGA 仕様の Mono Scope) において水平 300TV 本、垂直 300TV 本を肉眼観察で認めた。これは、同一チャートを CRT に表示し、本ディスプレイ観察時と同一画角 (水平 15° 、垂直 7°) で見込む視距離から CRT を観察した時に判別できた解像度と同じであった。レーザー光源を用いることで発生するコヒーレントノイズ、スペックルノイズ⁹⁾は、一様な輝度の表示においても光源側に配置したノイズ対策光学系で肉眼観察では認められない程度まで軽減できた。

6. むすび

HOE と電子映像が表示できる SLM を使ったシースルーディスプレイを提案し、試作した。DMD に表示されたコンピュータ出力画像がマックスウェル視として呈示できる単眼、卓上形、単色 (赤) 表示のシースルーディスプレイを実現した。そして、マックスウェル視を与える光学素子に HOE を使用することで、シースルーで外界を見るのと同時に焦点深度が深い映像が観察できることを実証した。

マックスウェル視では、平行光線束を瞳中心で収束させて眼球内に光刺激を与える。したがって、空間光変調された平行光線束が SLM から発せられるような光学系を実現しなければならない。筆者らは、DMD にレーザー光線を照射し、DMD から空間光変調されて反射される光を再回折光学系によってマックスウェル視できる平行光線束に変換する手法を開発し、その有効性を確認した。

今後は、光学系の小形化、ならびにカラー化と眼間距離調整機構を装備した 2 眼式立体ディスプレイへと改良を進める予定である。

〔文 献〕

- 1) NHK 放送技術編: “3 次元映像の基礎”, オーム社 (1995)

- 2) 畑田: "瘦れない立体ディスプレイを探る", NIKKEI ELECTRONICS, 444, pp.205-223 (1988)
- 3) 堀木: "自然な立体視を目指した立体表示技術の動向", 画像電子学会研究会予稿, 99-04-08, pp.43-48 (1999)
- 4) R.T.Azuma: "A survey of augmented reality", Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 6, 4, pp.355-385(1997)
- 5) 辻内: "ホログラフィー", 芸亭房 (1997)
- 6) G. Westheimer, : "The Maxwellian View ", Vision Res., 6, pp.669-682 (1986)
- 7) T.Ando, K.Yamasaki, M.Okamoto, E.Shimizu, : "Head Mounted Display using Holographic Optical Element", SPIE Proc., 3293, pp.183-189 (1998)
- 8) 久保田, 浮田, 會田 "光学技術ハンドブック", p.732, 朝倉書店 (1990)
- 9) A. Felipe, J.M.Artigas, A.M.Pons: "Human contrast sensitivity in coherent Maxwellian View : effect of coherent noise and comparison with speckle ", J.Opt.Soc.Am. A, 14, 5, pp.972-983 (1997)
- 10) 稲見, 川上, 柳田, 前田, 館: "マクスウェル光学系による広視野立体ディスプレイ", TVRSJ, 4, 1, pp.287-294 (1999)
- 11) 川村, 戸崎, 原, 山田: "ヘッドマウンテッドディスプレイ (HMD) の開発", 3次元画像コンファレンス'94 講演論文集, pp.239-244(1994)
- 12) T.Ando, K.Yamasaki, M.Okamoto, T.Matsumoto, E.Shimizu: "Evaluation of HOE for Head Mounted Display", SPIE Proc., 3637, pp.110-118 (1999)
- 13) 堀山, 新地: "ディジタルライトプロセッシングの現状と将来展望", 光学, 25, 4, pp224-228(1998)

- 14) 鈴木: "応用光学 I", pp.165-170, 朝倉書店 (1952)
- 15) 小玉: "光", pp.578-579, 棋書店 (1964)
- 16) 飯塚: "光工学", pp.59-62, 共立出版 (1977)



あんどう たかひさ
安東 孝久 1983年, 岡山大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年, 三洋電機(株)入社。MRIシステム, 画像処理システム, 立体ディスプレイの研究開発に従事。1997年, (財)イメージ情報科学研究所に出向。VR, HOE, 3Dディスプレイの研究に従事。現在, 三洋電機(株)ハイパーメディア研究所勤務。



まつもと としあき
松本 敏昭 1998年, 大阪市立大学工学部電気工学科卒業。2000年, 同大学大学院工学研究科前期博士課程電気工学専攻修了。現在, 松下電器産業(株)勤務。



しみず えいじ
志水 英二 1983年, 大阪大学工学部電子工学科卒業。同年, 大阪市立大学工学部助手。1983年, 同学工学部電気工学科教授となり, 現在に至る。電子回路, オプトロニクス, 光情報処理および動画ホログラフィの研究に従事。工学博士。正会員。